

Beschreibung

Stand der Technik

Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zur Bestimmung des Brennraumdruckverlaufes in Abhängigkeit vom Kurbelwellenwinkel bei einer Brennkraftmaschine, die wenigstens einen Brennraumdrucksensor bzw. Zylinderdrucksensor und einen Kurbelwellenwinkelsensor aufweist, nach der Gattung des Hauptanspruchs.

Es ist bekannt, in Zylindern von Brennkraftmaschinen, Brennraumdrucksensoren einzusetzen und deren Ausgangssignale zur Ermittlung von Größen, die den Verbrennungsvorgang im Zylinder der Brennkraftmaschine beschreiben, zu gewinnen. Dabei ist es beispielsweise bekannt, das sogenannte Differenzdruckintegral zu ermitteln. Dieses Differenzdruckintegral ist ermittelbar, wenn eine Differenz gebildet wird zwischen dem im gefeuerten Betrieb gemessenen Brennraumdruckverlauf und dem Druckverlauf im geschleppten Betrieb der Brennkraftmaschine, also ohne Verbrennung und diese Differenz aufintegriert wird. Dieses Differenzdruckintegral ist eine sehr wesentliche Größe, da sich mit Hilfe seiner Größe erkennen läßt, wie die Verbrennung abgelaufen ist und ob überhaupt eine Verbrennung stattgefunden hat oder ob ein Verbrennungsaussetzer aufgetreten ist. Über die Schwerpunktgröße des Differenzdruckintegrals oder seine 50%-Lage läßt sich eine Verbrennungslage-Regelung durchführen, da diese beiden Größen gut miteinander korrelieren.

Das Problem bei der exakten Berechnung des Differenzdruckintegrals besteht darin, daß bei normalem Betrieb, also bei gefeuertem Betrieb, bei dem Verbrennungen stattfinden sollen, der tatsächliche Druckverlauf über dem Kurbelwellenwinkel im Brennraum zwar gemessen werden kann, der geschleppte Verlauf jedoch nicht vorliegt und nach irgendwelchen Kriterien ermittelt werden muß. Für die Ermittlung des geschleppten Brennraumdruckverlaufs gibt es bereits einige Vorschläge. So wird beispielsweise in der Druckschrift WO 89/03 983 ein Verfahren beschrieben, bei dem der im geschleppten Betrieb, also ohne Verbrennung zu erwartende Druckverlauf berechnet wird, indem der gemessene Druckverlauf über dem Kurbelwellenwinkel oberhalb eines Kurbelwellenwinkels, der dem oberen Totpunkt OT entspricht, an einer durch den Kurbelwellenwinkel $\alpha = OT$ verlaufenden Achse gespiegelt wird. Dadurch ergibt sich ein symmetrischer Kurvenverlauf zur Achse durch den oberen Totpunkt OT. Durch Vergleich des gespiegelten Druckverlaufs mit dem tatsächlich gemessenen Druckverlauf und Integration der Differenz läßt sich das Differenzdruckintegral, das als Maß für die aufgetretene Verbrennung verwendet wird, ermitteln.

Bei der Festlegung des Druckverlaufs über dem Kurbelwellenwinkel im geschleppten Betrieb nach der vorstehend beschriebenen Methode können Fehlmessungen auftreten, wenn der Zündzeitpunkt "früh" liegt. Bei einem solchen frühen Zündzeitpunkt, bei dem eine Entflammung im Zylinder bereits bei der OT-Lage oder gegebenenfalls schon vorher auftritt, handelt es sich bei dem durch Spiegelung am OT gebildeten Druckverlauf nicht mehr um den Brennraumdruckverlauf für geschleppten Betrieb, da bereits Drucksteigerungen, die vom Verbrennungsvorgang selbst erzeugt werden, den Druckverlauf beeinflussen.

Vorteile der Erfindung

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufs bzw. des Zylinderdruckverlaufs in Abhängigkeit vom Kurbelwellenwinkel einer Brennkraft-

maschine mit wenigstens einem Zylinderdrucksensor und einem Kurbelwellenwinkelsensor hat demgegenüber den Vorteil, daß ein Brennraumdruckverlauf ermittelbar ist, der mit Sicherheit durch Verbrennungsvorgänge verfälscht ist und somit den im geschleppten Betrieb zu erwartenden Brennraumdruckverlauf wiedergibt. Erzielt wird dieser Vorteil, indem bei einem Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 der Brennraumdruckverlauf aus wenigstens drei aufeinander folgenden Teilverläufen zusammengesetzt wird, wobei in einem ersten Kurbelwellenwinkelbereich ein gemessener Druckverlauf verwendet wird, in einem zweiten Kurbelwellenwinkelbereich ein unter Berücksichtigung thermodynamischer Gegebenheiten berechneter Brennraumdruckverlauf und in einem dritten Kurbelwellenwinkelbereich ein durch Spiegelung der beiden ersten Teilbereiche erhaltener Brennraumdruckverlauf verwendet wird.

Weitere Vorteile der Erfindung werden durch die in den Unteransprüchen angegebenen Maßnahmen erzielt. Dabei ist es besonders vorteilhaft, daß das sogenannte Differenzdruckintegral, das aus der Differenz zwischen gemessenem Brennraumdruckverlauf und erfindungsgemäß bestimmten Brennraumdruckverlauf und Integration der Differenzen erhalten wird, besonders exakt bestimmt werden kann. Damit läßt sich auch eine besonders genaue Regelung der Brennkraftmaschine durchführen, beispielsweise eine Regelung der Verbrennungslage über den Schwerpunkt oder die 50%-Lage des Differenzdruckintegrals.

Durch Berücksichtigung meßbarer Besonderheiten des Brennraumdruckverlaufs über dem Kurbelwellenwinkel lassen sich vorteilhafte Anpassungen bei der Bestimmung des Brennraumdruckverlaufes im geschleppten Betrieb erzielen. Insbesondere können in vorteilhafter Weise die motorischen Verluste, die bei den meisten Motoren bzw. Brennkraftmaschinen nicht vermeidbar sind, genau kompensiert werden, wenn der gesamte berechnete Brennraumdruckverlauf um wenige Grad KW nach "spät" verschoben wird. Dabei wird eine Verschiebung des berechneten Brennraumdruckverlaufs beispielsweise um 3 Grad Kurbelwellenwinkel in Richtung größerer Kurbelwellenwinkel durchgeführt.

Um Nullpunktfehler der Brennraumdrucksensoren auszuschließen, kann in vorteilhafter Weise ein Referenzpunkt gewählt werden, bei dem der Brennraumdruck ungefähr bekannt ist, dies ist beispielsweise der Ladungswechsel-OT, bei dem bei Saugmotoren etwa Umgebungsdruck herrschen muß. Unter Voraussetzung einer linearen Sensorcharakteristik kann dann die Referenzspannung von der Sensorspannung in der Hochdruckphase abgezogen werden und so in vorteilhafter Weise ein Referenzdruck, der etwa dem Umgebungsdruck entspricht, zum berechneten Brennraumdruckverlauf hinzuaddiert werden. Anhand einer Plausibilitätsuntersuchung für den Referenzpunkt lassen sich Fehlmessungen in vorteilhafter Weise erkennen.

Zeichnung

Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Im einzelnen zeigt Fig. 1 eine an sich schon bekannte Einrichtung zur Erfassung des Druckverlaufs in den Zylindern einer Brennkraftmaschine. Fig. 2 zeigt den Verlauf des gemessenen Brennraumdrucks über dem Kurbelwellenwinkel sowie den erfindungsgemäß ermittelten Brennraumdruckverlauf im geschleppten Betrieb. In Fig. 3 ist ein gemessener und ein berechneter Brennraumdruckverlauf im geschleppten Betrieb über dem Kurbelwellenwinkel dargestellt und Fig. 4 zeigt einen berechneten Druckverlauf und einen gespiegelten über dem Kurbelwellenwinkel. Fig. 5 zeigt eine Fehlerbetrachtung bei Verwendung eines herkömmlichen Verfah-

rens und des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Berechnung des Druckverlaufs im geschleppten Betrieb.

Beschreibung

In Fig. 1 sind die erfindungswesentlichen Bestandteile einer Brennkraftmaschine dargestellt, für die das erfindungsgemäße Verfahren zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufs in Abhängigkeit vom Kurbelwellenwinkel der Brennkraftmaschine durchgeführt werden kann. Bei einer solchen Vorrichtung sind in den Zylindern 10, 11, 12 und 13 der Brennkraftmaschine jeweils Zylinderdrucksensoren 14, 15, 16 und 17 angeordnet, die im wesentlichen druckproportionale Ausgangsspannungen U1, U2, U3 und U4 abgeben. Weiterhin ist ein Kurbelwellensensor 18 vorhanden, der ein für den Kurbelwellenwinkel α charakteristisches Ausgangssignal S1 abgibt.

Sowohl die Ausgangsspannungen der Zylinderdrucksensoren 14, 15, 16 und 17 als auch das Ausgangssignal des Kurbelwellensensors 18 werden dem Steuergerät 19 der Brennkraftmaschine zugeführt, das diese Signale verarbeitet. Über Eingänge 20 können dem Steuergerät 19 weitere Signale, beispielsweise eine Temperatur T, eine Last L usw. zugeführt werden, die im Steuergerät 19 ebenfalls weiter verarbeitet werden können.

Das Steuergerät 19 umfaßt einen Mehrkanal-Analog-/Digitalwandler 22, dem die Ausgangsspannungen der Zylinderdrucksensoren zugeführt werden. Die eigentliche Signalauswertung erfolgt in einem Mikroprozessor 23 des Steuergerätes 19, der über eine Ausgabereinheit 23a in Abhängigkeit von den ermittelten Größen Steuersignale S2 und S3 an verschiedene Komponenten der Brennkraftmaschine abgibt und beispielsweise werden Zünd- und/oder Einspritzimpulse vom Steuergerät in Abhängigkeit vom Brennraumdruckverlauf abgegeben. Der Mikroprozessor 23 umfaßt im übrigen neben der zentralen Prozessoreinheit in üblicher Weise Speicher u. ä.

Im Mikroprozessor 23 des Steuergerätes 19 erfolgt die eigentliche Signalverarbeitung sowie die Berechnungen, die erforderlich sind, um den gesamten Druckverlauf über ein Arbeitsspiel des Zylinders zu erhalten. Dazu wird zunächst das druckproportionale elektrische Spannungssignal, beispielsweise U1 mit dem Kurbelwellenwinkel α synchronisiert. Danach liegen dem Mikroprozessor 23 kurbelwellenwinkelbezogene Druckwerte P1 (α) vor, die für die erforderlichen Berechnungen zur Verfügung stehen.

Zum Erhalt des tatsächlichen Brennraumdruckverlaufs im normalen Betriebszustand der Brennkraftmaschine erfolgt die Signalauswertung in einem Bereich von -360°KW bis 360°KW , oder je nach Anwendung kleiner. Der Signalverlauf, der real erhalten wird, ist in der oberen Kurve der Fig. 2 dargestellt. Das zu ermittelnde Differenzdruckintegral I läßt sich nur berechnen, wenn auch der Druckverlauf im geschleppten Betrieb exakt bekannt ist. Wie dieser Brennraumdruckverlauf aus drei Teilverläufen im geschleppten Betrieb ermittelt wird, wird im folgenden näher erläutert. In einem ersten Kurbelwellenwinkelbereich, der sich beispielsweise von -360°KW bis -30°KW erstreckt, also 30°KW vor dem oberen Totpunkt endet, wird der Brennraumdruckverlauf im geschleppten Betrieb so festgelegt, daß er dem gemessenen Brennraumdruckverlauf entspricht. In diesem Bereich, der mit B1 bezeichnet ist treten mit Sicherheit bei korrekten Verbrennungsumständen keine Verbrennungsvorgänge auf, so daß der real gemessene Druckverlauf auch identisch dem Druckverlauf im geschleppten Betrieb entspricht. In einem weiteren Bereich, der mit B2 bezeichnet ist und sich an den Bereich B1 anschließt und bis zum oberen Totpunkt OT reicht, wird der

Druckverlauf im geschleppten Betrieb anhand der zu erwartenden thermodynamischen Verhältnisse im Zylinder der Brennkraftmaschine ermittelt. Es wird dabei der Verdichtungs- bzw. Kompressionsdruck bis zum oberen Totpunkt OT mit Hilfe der Polytropengleichung berechnet. Da in diesem Bereich B2 bereits Verbrennungen beginnen können, würde eine Auswertung des gemessenen Brennraumdruckverlaufs bei der Bestimmung des Brennraumdruckverlaufs im geschleppten Betrieb zu Fehlern führen und wird daher nicht durchgeführt. Aus dem in den Bereichen B1 und B2 ermittelten Brennraumdruckverlauf im geschleppten Betrieb wird im folgenden der Brennraumdruckverlauf im geschleppten Betrieb im Bereich B3 ermittelt, der sich vom oberen Totpunkt OT bis zum Kurbelwellenwinkel 360°KW erstreckt. Dieser Druckverlauf sollte für einen idealen Motor spiegelbildlich zum Druckverlauf zwischen -360°KW und OT sein. Es wird daher im Bereich B3 ein Druckverlauf angenommen, der einer Spiegelung des Druckverlaufs zwischen -360°KW und OT entspricht. Die Druckkurve wird daher an einer Linie, die durch OT läuft, gespiegelt. Als Formel läßt sich die Vorgehensweise wie folgt darstellen:

$$P(i) = p(k) \cdot (v(k)/v(i))^n$$

In dieser Gleichung bedeuten die einzelnen Größen: p(i): Druck zwischen dem letzten gemessenen Druckwert und OT

p(k): Letzter gemessener Verdichtungsdruckwert

v(k): Zylindervolumen, ab dem der Verdichtungsdruck berechnet wird

v(i): Zylindervolumen zum Berechnungszeitpunkt

n: Polytropenexponent, der beispielsweise experimentell ermittelt wird

Der Ausdruck $(v(k)/v(i))^n$ kann zur Verringerung der Rechenzeit in Speichermitteln des Mikroprozessors 23 des Steuergerätes 19 tabellarisch abgelegt werden. Mit diesen Voraussetzungen läßt sich der Brennraumdruckverlauf im geschleppten Betrieb laufend ermitteln. Wird er vom gemessenen Brennraumdruckverlauf abgezogen und die Differenz aufintegriert, wird das Differenzdruckintegral I, das in Fig. 2 als schraffierte Fläche dargestellt ist, erhalten. Die Subtraktion sowie die Integration der Differenzwerte wird ebenfalls im Mikroprozessor 23 durchgeführt. Das Differenzdruckintegral steht dem Mikroprozessor 23 dann für weitere Berechnungen bzw. Auswertungen und Regelschritte zur Verfügung. Beispielsweise wird in bekannter Weise der Flächenschwerpunkt des Integrals I bestimmt oder die 50%-Lage des Differenzdruckintegrals, wobei anhand dieser Größen weitere Regelvorgänge durchgeführt werden können.

Bei der Auswertung und dem Vergleich zwischen gemessenem Druckverlauf, gerechneten Druckverlauf und gespiegeltem Druckverlauf hat sich gezeigt, daß gegebenenfalls weitere Anpassungen bei der Bestimmung des Brennraumdruckverlaufs im geschleppten Betrieb erfolgen sollten. Es wurde dabei bei der Auswertung erkannt, daß die motorischen Verluste besser berücksichtigt werden, wenn der gesamte berechnete Druckverlauf um wenige Grad KW nach "spät" verschoben wird, also wenn der gesamte berechnete Druckverlauf um wenige Grad KW zu höheren Kurbelwellenwinkelwerten verschoben wird. Dabei wurde nur die Zuordnung von $p(i) = f(i)$ verschoben in: $p(i-1) = f(i)$. Da die Rechenschritte 3°KW betragen, beträgt auch die Verschiebung 3°KW . Mit einer solchen Verschiebung läßt sich die ermittelte Kurve für den Brennraumdruckverlauf in geschlepptem Betrieb sehr gut an einen realen Verlauf unter Berücksichtigung der nicht zu vermeidenden motorischen Verluste anpassen.

Zur Ausschaltung des Nullpunktfehlers (Drift) des Zylinderdrucksensors bzw. der Zylinderdrucksensoren kann eine Korrektur anhand eines Referenzpunktes durchgeführt werden. Als Referenzpunkt kann dabei ein Kurbelwellenwinkel gewählt werden, bei dem der Druck ungefähr bekannt ist. Dies ist beispielsweise im Ladungswechsel-OT der Fall. Im Ladungswechsel-OT entspricht der Brennraumdruck bzw. Zylinderdruck bei Saugmotoren etwa dem Umgebungsdruck. Bei linearer Sensorcharakteristik wird die Referenzspannung von der Sensorspannung in der Hochdruckphase abgezogen und der Referenzdruck (ein ungefährer Umgebungsdruck) dazugaddiert. Für diese Korrektur der Nullpunktdrift gilt somit:

$$p(j) = p_0 + m \cdot (u(j) - u_0)$$

Dabei bedeuten im einzelnen:

$p(j)$: Gemessener Druck

p_0 : Ungefährer Umgebungsdruck

u_0 : Spannung des Drucksensors im Ladungswechsel-OT

$u(j)$: Spannung des Drucksensors

m : Steigung der Sensorkennlinie bei linearem Zusammenhang zwischen Druck und Spannung

Durch den vorstehend wiedergegebenen Zusammenhang läßt sich somit ein Referenzpunkt für die Berechnung gewinnen, der sehr wichtig ist. Damit eine Fehlmessung nicht die gesamte Berechnung zerstört, muß der Referenzpunkt entweder stark gefiltert werden oder er muß auf Plausibilität überprüft werden und beispielsweise mit einem erwarteten Druckwert verglichen werden, wodurch bei zu starker Abweichung auf einen Fehler geschlossen werden kann.

Bei guter Anpassung der einzelnen Parameter, u. a. auch des Polytropenexponenten n läßt sich der Druckverlauf der geschleppten Brennkraftmaschine sehr gut nachbilden. Fig. 3 zeigt einen Zusammenhang zwischen einem im geschleppten Betrieb gemessenen Druckverlauf PG1 und einem berechneten Druckverlauf PB1. Speziell bei sehr frühen Zündwinkeln wird eine sehr gute Übereinstimmung erhalten, da Einflüsse durch vorzeitige Verbrennungen keine Auswirkungen auf den berechneten Druckverlauf haben.

Wie die Fig. 4, in der ein berechneter Druckverlauf PB2 und ein an OT gespiegelter Druckverlauf PG2 dargestellt sind, zeigt, ist die Übereinstimmung zwischen dem berechneten und den gespiegelten Druckverlauf nicht optimal, da speziell bei sehr frühen Zündwinkeln ein Teil des "Verdichtungsdruckes" schon von der Verbrennung hervorgerufen wird. Dadurch wird das berechnete Differenzdruckintegral zu klein und auch die Schwerpunktlage ist nicht korrekt. Durch das erfindungsgemäße Verfahren ist es möglich, das Differenzdruckintegral besonders genau zu ermitteln, damit wird auch die Genauigkeit aller darauf basierender Verfahren erhöht. Dies gilt für die Aussetzererkennung und die Momentenberechnung, die anhand des Differenzdruckintegrals in bekannter Weise durchgeführt werden. Speziell bei der Ermittlung der Schwerpunktlage des Differenzdruckintegrals zur Verbrennungslageregelung wird der Fehler bei herkömmlichen Verfahren bei sehr frühen Zündwinkeln so groß, daß die Schwerpunktlage nicht mehr streng monoton vom Zündwinkel abhängig ist. Damit ist keine Regelung mehr möglich. In Fig. 5 ist der Zusammenhang zwischen Verbrennungslage VBL in Grad KW nach dem oberen Totpunkt und Zündzeitpunkt ZZP in Grad KW vor dem oberen Totpunkt bei konstanter Drehzahl für ein herkömmliches Verfahren (Valt) und das erfindungsgemäße Verfahren (Vneu) dargestellt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufes in Abhängigkeit vom Kurbelwellenwinkel in wenigstens einem Zylinder einer Brennkraftmaschine, mit wenigstens einem Brennraumdrucksensor bzw. Zylinderdrucksensor, der ein druckabhängiges Signal liefert, das zu einem von einem Kurbelwellenwinkelsensor gelieferten Signal in Bezug gesetzt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Druckverlauf aus wenigstens drei aufeinanderfolgenden Teilverläufen gebildet wird, wobei er in einem ersten Bereich aus einem gemessenen Verlauf, in einem zweiten Bereich aus einem unter Berücksichtigung thermodynamischer Gegebenheiten berechneten Verlauf und in einem dritten Bereich durch Spiegelung der beiden ersten Teilverläufe ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung des Teilverlaufs im zweiten Bereich mit Hilfe der Polytropengleichung erfolgt, wobei der Polytropenexponent n brennkraftmaschinen-spezifisch experimentell ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung des Brennraumdruckverlaufes im geschleppten Betrieb nach folgender Gleichung erfolgt:

$$p(i) = a \cdot p(k) \cdot (v(k)/v(i))^{**n} + b$$

mit:

$p(i)$: Druck zwischen dem letzten gemessenen Druckwert und OT

$p(k)$: letzter gemessener "Verdichtungsdruckwert"

$v(k)$: Zylindervolumen, ab dem der Verdichtungsdruck gerechnet wird

$v(i)$: Zylindervolumen zum Berechnungszeitpunkt

n : Polytropenexponent (z. B. experimentell ermittelt)

a, b : Anpassungsfaktoren zur Feinabstimmung

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Ausdruck $(v(k)/v(i))^n$ in einem Speicher des Mikroprozessors abgelegt ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der gesamte berechnete Druckverlauf um einige Grad KW zu größeren KW-Werten hin verschoben wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Nullpunktfehler des Brennraumdrucksensors bzw. der Brennraumdrucksensoren ermittelt und kompensiert wird, indem der Zusammenhang zwischen Sensorausgangsspannung und Druck in einer Kurbelwellenstellung, in der der Druck bekannt ist und im wesentlichen dem Umgebungsdruck entspricht, berücksichtigt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Nullpunktfehlerkompensation unter Berücksichtigung der folgenden Zusammenhänge erfolgt:

$$p(j) = p_0 + m \cdot (u(j) - u_0)$$

mit:

$p(j)$: gemessener Druck

p_0 : ungefährer Umgebungsdruck

u_0 : Spannung des Drucksensors im Ladungswechsel-OT

$u(j)$: Spannung des Drucksensors

m : Steigung der Sensorkennlinie

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Referenzpunkt auf Plausibilität überprüft

wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Differenzdruckintegral gebildet wird, indem vom gemessenen Brennraumdruckverlauf der berechnete Brennraumdruckverlauf im geschleppten Betrieb abgezogen wird und die Differenzwerte aufsummiert oder aufintegriert werden. 5

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwerpunkt oder die 50%-Lage des Differenzdruckintegrals ermittelt werden und diese Lagen in Verbindung mit einer Verbrennungslageregelung als Istwert verwendet werden. 10

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Differenzdruckintegral in Verbindung mit einer Aussetzererkennung und/oder Momentenberechnung ausgewertet wird. 15

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Fig. 1

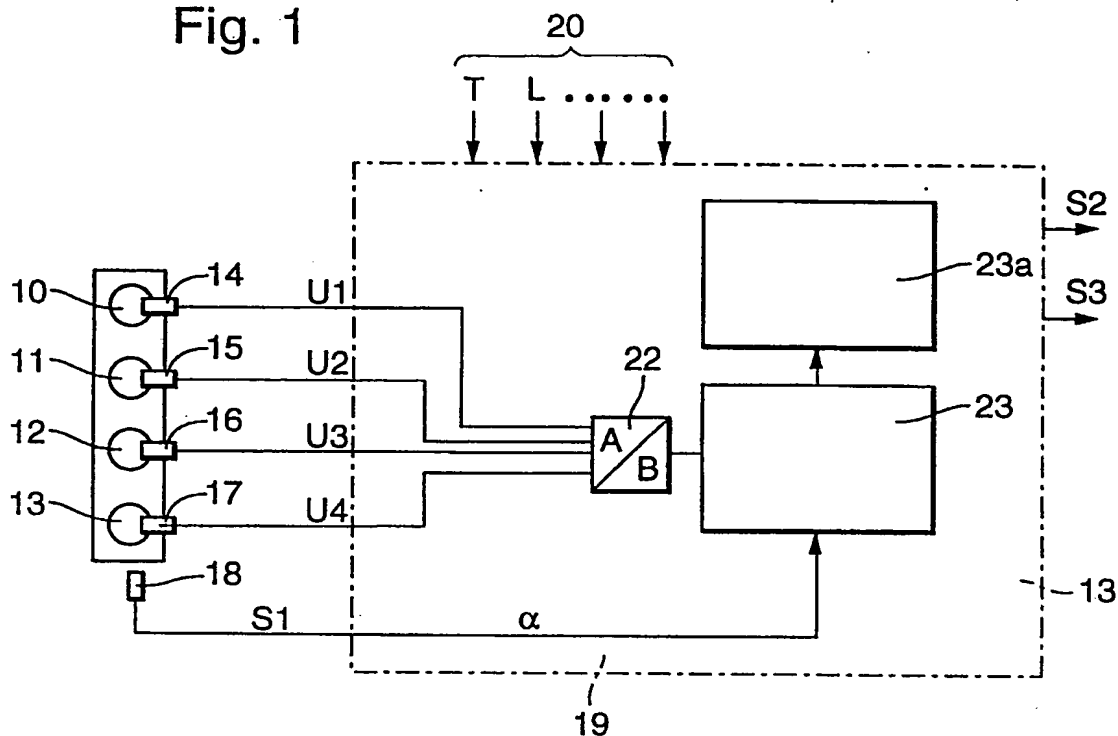


Fig. 2

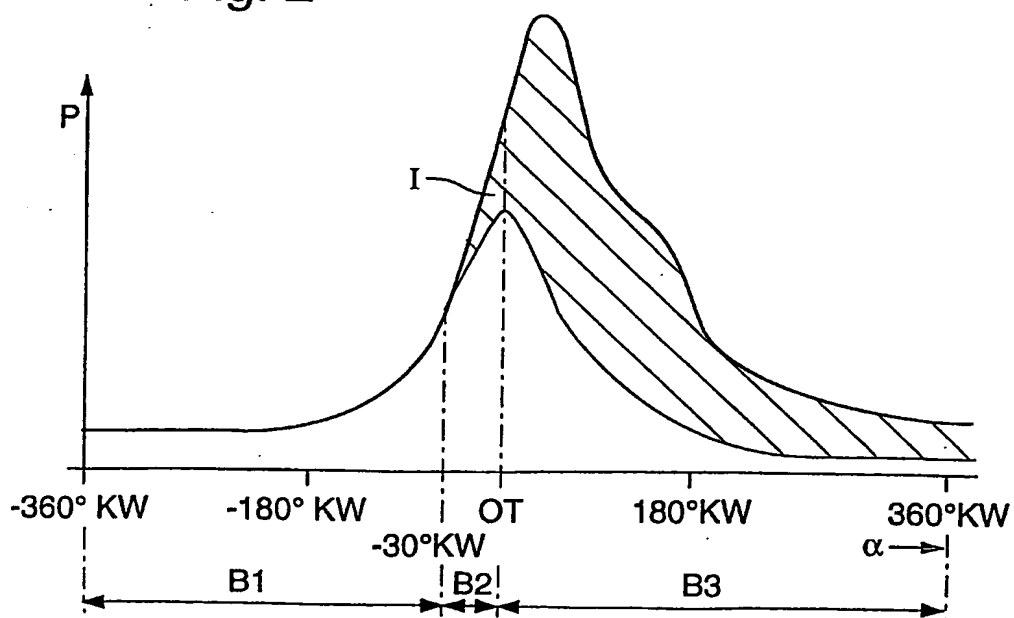


Fig. 3

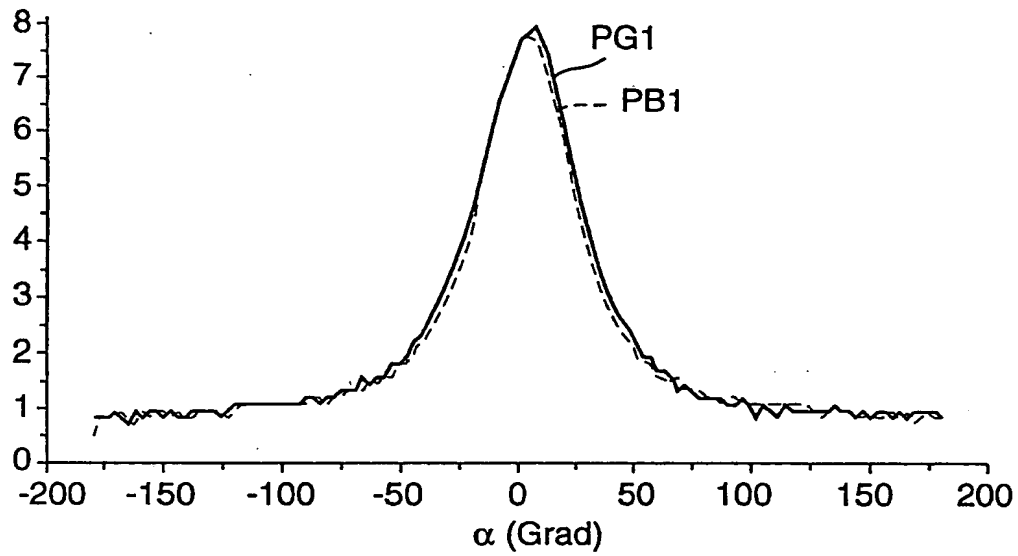


Fig. 4

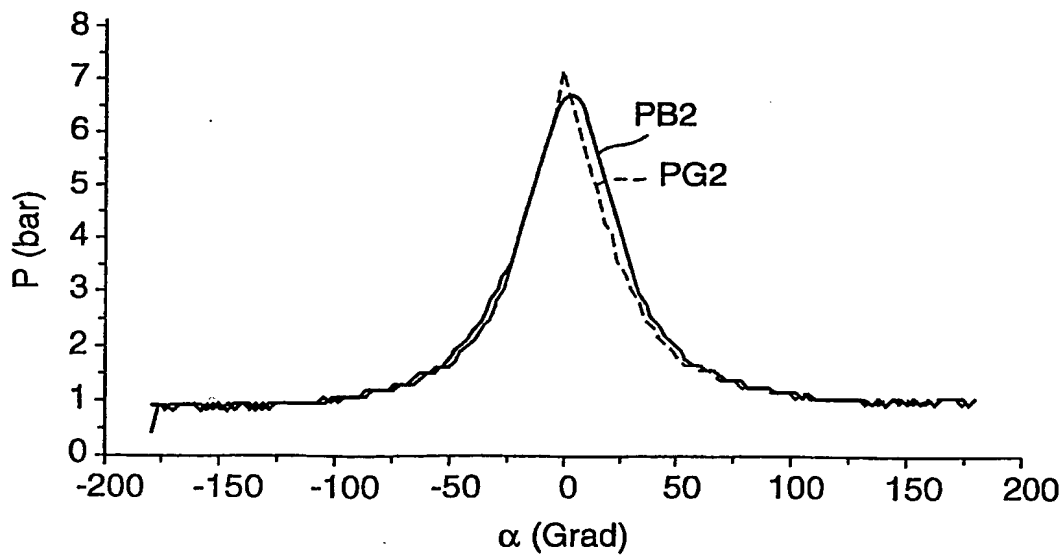


Fig. 5

